

## TENDÊNCIA DAS SÉRIES TEMPORAIS DE UM LAGO AMAZÔNICO IMPACTADO POR REJEITO DE MINERAÇÃO

Enoque Gonçalves Ribeiro<sup>1</sup>

Maria Silvina Bevilacqua<sup>2</sup>

Reinaldo Luiz Bozelli<sup>3</sup>

Francisco de Assis Esteves<sup>4</sup>

Marcos Paulo Figueiredo-Barros<sup>5</sup>

Recursos Hídricos e Qualidade da Água

### *Resumo*

Localizado na margem direita do Rio Trombetas, o Lago Batata (Oriximiná, Pará, Brasil) é um típico lago da planície de inundação de águas claras da Amazônia, que sofreu impactos antropogênicos decorrentes de atividades de mineração. Entre 1979 até 1989 recebeu 180 milhões de m<sup>3</sup> de rejeito das atividades de mineração de bauxita que assorearam 30% de sua área total. Entre outros numerosos impactos locais destaca-se o aumento de Turbidez e Sólidos Totais Suspensão. Desde 1989, um complexo programa de monitoramento limno-ecológico ocorre em duas áreas desse ecossistema: a área impactada e a natural. Objetiva-se verificar se as variáveis Sólidos Totais em Suspensão, Turbidez e Matéria Orgânica do Sedimento indicam na série histórica da área impactada e permanentemente alagada do Lago Batata a recuperação do ecossistema quando comparadas com as tendências destas variáveis em áreas não impactadas. No presente estudo, analisamos 28 anos de variáveis ambientais monitoradas no Lagoa Batata e diagnosticamos os efeitos remanescentes do assoreamento por rejeito de bauxita na área impactada comparando com os dados da área natural. Foram analisadas as tendências para as variáveis: Sólidos Totais em Suspensão, Turbidez e Matéria Orgânica. Os resultados obtidos indicam que a Matéria Orgânica está cobrindo o rejeito de mineração de bauxita no fundo do lago, evitando sua ressuspensão e consequentemente contribuindo para a redução dos níveis de Turbidez e Sólidos Totais em Suspensão de origem inorgânica na área impactada. O diagnóstico atual indica que, após 28 anos, para os aspectos físicos destas variáveis ambientais o lago apresenta sinais de recuperação.

Palavras-chave: Matéria Orgânica; Turbidez; Recuperação; Série Histórica

<sup>1</sup> Aluno do Doutorado em Ciências Ambientais e Conservação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade - NUPEM, [yuegribeiro@gmail.com](mailto:yuegribeiro@gmail.com).

<sup>2</sup> Pós Doutoranda, Universidade Federal do Rio De Janeiro – Laboratório de Limnologia-Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade - NUPEM, [mariasilvinabevilacqua@gmail.com](mailto:mariasilvinabevilacqua@gmail.com).

<sup>3</sup> Prof. Dr. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia, [rbozelli@gmail.com](mailto:rbozelli@gmail.com).

<sup>4</sup> Prof. Dr. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade – NUPEM, [festeves@globo.com](mailto:festeves@globo.com).

<sup>5</sup> Prof. Dr. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Biodiversidade e Sustentabilidade – NUPEM, [mpaulo.bio@gmail.com](mailto:mpaulo.bio@gmail.com).

## INTRODUÇÃO

Na região Porto Trombetas, Oriximiná – PA está localizada uma das maiores jazidas de bauxita do mundo e conseqüentemente uma das maiores instalações para extração, beneficiamento e transporte do minério (MÁRTIRES, 2009). Ela responde por 90% das reservas nacionais (3,4 bilhões de toneladas) e 10% das reservas mundiais. Com operações iniciadas na década de 70, atualmente a capacidade de produção anual instalada da Mineração Rio do Norte (MRN) é de 18.1 milhões de toneladas, respondendo por 73% da produção nacional (MÁRTIRES, 2009).

Para comercialização da bauxita a mesma passa por um processo de beneficiamento, que consiste na lavagem do minério para retirada de argilas. Desse processo aproximadamente 25% do volume extraído se torna rejeito, uma lama de cor avermelhada e consistência aquosa, apresentando como uma das principais características granulométricas a porcentagem 53% de argila e elementos químicos que estão indisponíveis para absorção pela biota (LAPA, 2000).

Por falta de metodologias adequadas e seguindo a legislação vigente à época, entre os anos de 1979 a dezembro de 1989, o rejeito de bauxita foi lançado diretamente no Lago Batata (BOZELLI, ESTEVES, & ROLLAND, 2000). Calcula-se que neste período foram lançados 180 milhões de m<sup>3</sup> de rejeito (PANOSSO et al., 1995).

À medida que o rejeito era depositado no lago, ocorreu o assoreamento de suas áreas alagáveis que tiveram o leito elevado de 5 a 6 metros em alguns trechos, atingindo, portanto, uma área de 630 ha, cerca de 30% da área do lago (BOZELLI et al., 2000). O rejeito criou uma camada de sedimento no lago e a argila, de menor granulometria (CALLISTO & ESTEVES, 1996) e menos densa, permaneceu em suspensão na coluna d'água.

A elevada turbidez, evidenciada pela cor avermelhada em contraste com áreas não impactadas que apresentam cor azul verde claro, é considerada uma das principais evidências da natureza física deste impacto na parte permanentemente inundada do Lago Batata. A presença de rejeito em suspensão alterou a penetração de luz, o que interferiu diretamente nos produtores primários e promoveu sensível perda de habitat para reprodução e alimentação de peixes (BOZELLI et al., 2000). O rejeito depositado no lago permanece

no ambiente sujeito aos processos hidrológicos característicos do ecossistema e que provocam o deslocamento, suspensão e sedimentação (CARNEIRO, BOZELLI, & ESTEVES, 2003).

Neste contexto o Lago Batata tornou-se um raro caso de estudo com uma extensa série de dados temporais do monitoramento da coluna d'água, do sedimento e dos resultados das ações de mitigação sobre ele executados dentro do Programa de Monitoramento e Estudos Ecológicos do Lago Batata iniciado em 1989 (ESTEVES, 2000; SCARANO et al., 2018). As séries temporais permitem extrair informações significativas para estudar tendências, reconhecer padrões no espaço e/ou tempo a partir da interpretação da variação de parâmetros (HYNDMAN & ATHANASOPOULOS, 2018).

Objetiva-se verificar se as variáveis Sólidos Totais em Suspensão, Turbidez e Matéria Orgânica do Sedimento indicam na série histórica da área impactada e permanentemente alagada do Lago Batata a recuperação do ecossistema quando comparadas com as tendências destas variáveis em áreas não impactadas.

## METODOLOGIA

O Lago Batata localiza-se na margem direita no Médio-Baixo curso do rio Trombetas ( $1^{\circ}28'02.2''S$  a  $1^{\circ}32'25.0''S$  e  $56^{\circ}17'23.2''W$  a  $56^{\circ}20'11.5''W$ ), cerca de 7 Km a jusante de Porto Trombetas no município de Oriximiná – PA. O Lago Batata, é um lago de águas claras, originalmente caracterizados por águas ligeiramente ácidas, baixas concentrações de nutrientes e pobres em partículas em suspensão (PANOSSO, MUEHE, & ESTEVES, 1995; PRANCE, 1980). O mesmo teve 30% de sua área impactada pelo aporte de rejeito de mineração de 1979 a 1989.

Desde 1989 o Programa de Monitoramento e Estudos Ecológicos do Lago Batata realiza o monitoramento em estações de amostragem na área impactada e natural. Atualmente são amostradas 8 estações e este trabalho se valerá dos dados limnológicos da coluna d'água e sedimento da Estação Impactada 10 (E10), e das Estação Natural 07 e 08 (E07 e E08, respectivamente). Os registros de Sólidos Totais em Suspensão e Matéria Orgânica no sedimento foram obtidos em amostragens trimestrais durante cada uma das

fases do pulso de inundação (Enchente, Águas Altas, Vazante e Águas Baixas) de 1989 a 2017, e os dados de Turbidez de 1994 a 2017.

Para cada estação de amostragem foram coletadas amostras de água com garrafa do tipo Van Dorn e conduzidas ao laboratório para analisar a Turbidez (Turbidímetro portátil) e para determinar as concentrações de Sólidos Totais em Suspensão, onde cada amostra de água foi filtrada em duplicata em filtros de fibra de vidro GF1 (0,7  $\mu\text{m}$  de diâmetro dos poros).

Foram coletadas frações superficiais do sedimento (0-3 cm de profundidade) com coletor de sedimento tipo kajak e determinada a concentração de Matéria Orgânica através de incineração de uma alíquota de 1,5 gramas da amostra macerada após seca em estufa. O resultado foi obtido pela diferença entre o peso seco da amostra inicial e o peso das cinzas originárias da combustão a 550 graus por 4 horas da mesma, e expresso em porcentagem de peso seco.

Foi verificada a tendência das variáveis ambientais para cada estação de amostragem. O teste de Mann-Kendall ( $p < 0.05$ ) foi adotado por ser indicado para verificar a existência e significância da tendência em séries temporais de dados ambientais (SNEYERS, 1975). O pacote de código aberto Prophet foi utilizado para detectar alterações que apresentam capacidade de mudar a trajetória das variáveis ambientais, os chamados ponto de mudança na tendência das variáveis nas séries temporais (TAYLOR & LETHAM, 2018). Os pontos de mudança indicam a mudança no comportamento de tendências de uma variável e podem ser crescentes, decrescentes ou constantes (ZHANG et al., 2009).

As análises foram realizadas utilizando a plataforma R Statistics que é uma linguagem para computação de técnicas estatísticas e para preparação de visualização gráfica (BORCARD et al., 2018).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A série histórica (1994 a 2017) mostra uma clara tendência de redução dos valores de Turbidez no lago como um todo. Entretanto, a E10 apresentou valor superior para decréscimo e alta significância, que pode ser visualizado na maior inclinação da linha de

tendência (Figura 1). A E10 registrou os maiores valores no início da série histórica e nos últimos anos apresentou valores próximos as demais estações, isso faz com que a inclinação da tendência apresente direção a valores negativos.

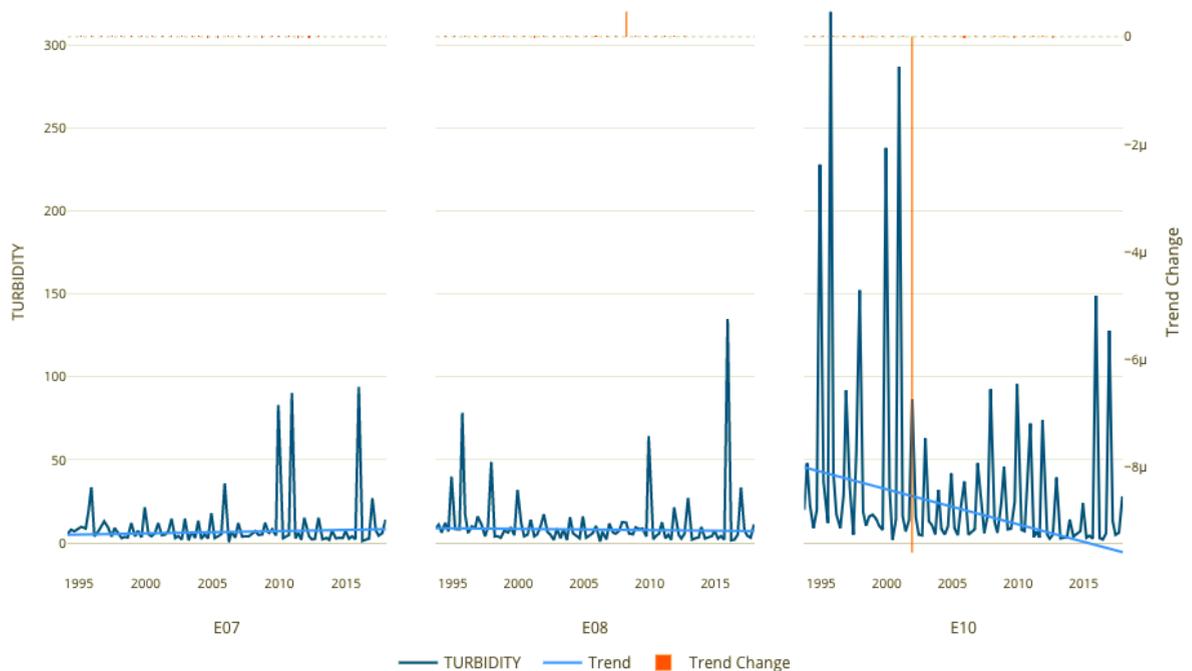


Figura 1. Tendência (Trend) e Pontos de Mudança (Trend Change) para a variável ambiental Turbidez registrados de 1994 a 2017 no Lago Batata. Turbidez (NTU) = TURBIDITY, Estação 07 (E07), Estação 08 (E08) e Estação 10 (E10).

Os dados de Sólidos Totais em Suspensão apresentaram tendência significativa (Mann-Kendall,  $p < 0.05$ ) indicando o decréscimo para E07 e E10. Os pontos de mudança com maior magnitude ocorreram na E07 na fase de Enchente de 2003 e durante a fase de Águas Altas de 2006, ambos pontos de mudança positivos. Ainda assim a tendência negativa para Sólidos Totais em Suspensão nesta estação de amostragem se mantém, ou seja, tendência de decréscimo. A E08 apresenta pontos de mudança com menor destaque ao longo de sua série temporal.

Observa-se que os registros de Sólidos Totais em Suspensão da E10 antes do ano de 2005 apresentam picos semelhantes aos das demais estações, mas com valores máximos atingidos superiores aos das E07 e E08 (Figura 2). Após 2005, os registros de Sólidos Totais em Suspensão apresentaram oscilações semelhantes para as estações de amostragem impactada e natural. A E10 apresentou pontos de mudança positivos e negativos com

magnitude baixa ao longo da série histórica, sendo detectado apenas um ponto de mudança negativo com magnitude alta. Apesar de no geral não serem identificados pontos de mudança com maior magnitude a tendência de decréscimo dos valores de Sólidos Totais em Suspensão na E10 se manteve durante a série histórica (Figura 2).

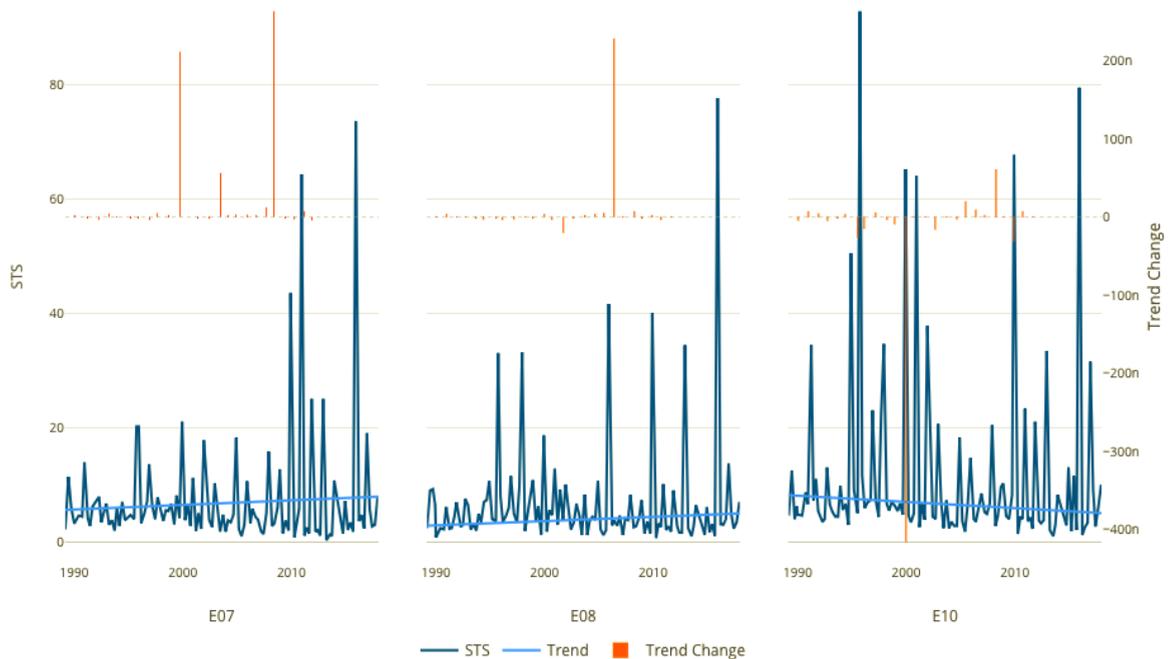


Figura 2. Tendência (Trend) e Pontos de Mudança (Trend Change) para a variável ambiental Sólidos Totais em Suspensão (STS) registrados de 1989 a 2017 no Lago Batata. Sólidos Totais em Suspensão (mg.L<sup>-1</sup>) = STS. Estação 07 (E07), Estação 08 (E08) e Estação 10 (E10).

Observa-se o comportamento semelhante para a variável de Matéria Orgânica do Sedimento em todas as estações (Figura 3). No início da série histórica os valores na estação impactada E10 eram inferiores aos registrados nas estações naturais e ainda durante a década de 90 os primeiros registros superiores para aquela estação de amostragem foram observados. Os valores de Matéria Orgânica do Sedimento apresentam trajetórias significativa (Mann-Kendall,  $p < 0.05$ ) apenas para a estação E10, sendo a tendência de acúmulo altamente crescente.

Detectou-se que as maiores magnitudes e maior número de pontos de mudança ocorreram entre os anos de 2000 e 2010 indicando que as estações E07 e E08 voltaram apresentar crescimento em suas tendências. Possivelmente as estações E07 e E08 não apresentaram tendência significativa (Mann-Kendall,  $p < 0.05$ ) para acréscimo de Matéria

Orgânica por apresentarem tendência de decréscimo que teve a trajetória modificada nos anos 2000, enquanto a estação E10 manteve sua trajetória crescente desde o início da série histórica (Figura 3).

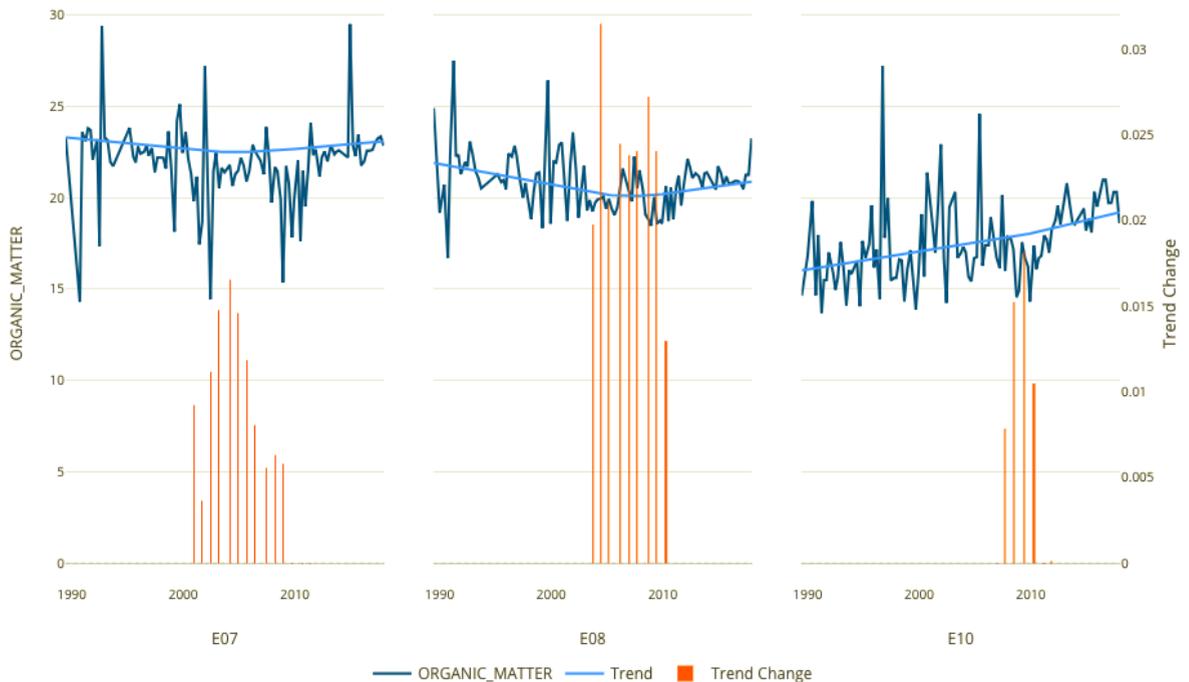


Figura 3. Tendência (Trend) e Pontos de Mudança (Trend Change) para a variável ambiental Matéria Orgânica do Sedimento registrados de 1989 a 2017 no Lago Batata. Matéria Orgânica do Sedimento (% p.s.) = ORGANIC\_MATTER. Estação 07 (E07), Estação 08 (E08) e Estação 10 (E10).

Evidências de que o Lago Batata se encontra em constante processo de recuperação puderam ser observadas através da redução de variáveis sensíveis ao efeito físico do impacto com rejeito de mineração de bauxita, que é traduzido pelo constante processo de suspensão e sedimentação do rejeito fino oriundo do impacto. Neste contexto, o aumento de Matéria Orgânica no sedimento lacustre se mostrou como um dos principais agentes no processo de recuperação do impacto e como principal parâmetro e referência dessa recuperação. Porém, a duração e intensidade do pulso de inundação impõe o lago a variações físicas, químicas e biológicas, alterando também tendências de longo prazo.

A ressuspensão de sedimento fino que ocorre na área impactada está também associado ao aumento nos valores de Turbidez, mas também ocorre nas áreas naturais que apresentam sedimento fino de origem orgânica e em alguns eventos de elevada densidade fitoplantônica. Destaca-se que lagos Amazônicos naturais apresentaram valores entre 2.7 e

137 NTU durante a fase de Águas Baixas (Affonso, Queiroz, & Novo, 2015), sendo que a estação E10 apresentou na fase de Águas Baixas valores médios de 87.01 NTU, máximos de 287 NTU e mínimos de 14.08 NTU, enquanto a estação E07 apresentou valores médios de 26.96 NTU, máximos de 94.10 NTU e mínimos de 7.28 NTU.

Foi observado ainda que os picos de Turbidez para estação E10 são mais frequentes nos primeiros anos de monitoramento e que ao longo dos anos ela apresenta redução dos valores máximos registrados, e acompanhando o pico de máximo e mínimo que ocorrem nas outras estações.

As estações E07 e E10 apresentaram tendência significativa para redução das variáveis Sólidos Totais em Suspensão e Turbidez, sendo apresentada uma redução mais acentuada na estação impactada. A diminuição da presença de rejeito na coluna d'água relaciona-se a redução nos valores dessas variáveis na estação impactada. Isto pode ser atribuído a fatores que propiciam o acúmulo de Matéria Orgânica e sedimento natural sobre o rejeito de bauxita, ambos relacionados a regeneração natural e aos resultados das ações de mitigação empregados na área marginal. Historicamente os registros de Matéria Orgânica do Sedimento para a estação E10 eram inferiores em relação a E07 devido a característica mineral da argila, principal componente do rejeito, que se depositou sobre o sedimento natural. Porém, foi verificado na estação E10 uma tendência significativa para aumento de Matéria Orgânica no Sedimento, tendo inclusive nos últimos 10 anos apresentando esporadicamente valores semelhantes e até superiores aos registrados na estação E07. O aumento do percentual de Matéria Orgânica na área impactada pode ser explicado, principalmente, pelos seguintes fatores que fornecem material orgânico morto para o lago: (i) colonização de *Oryza glumaepatula* (arroz selvagem) nas áreas próximas a estação E10, cerca de 8 ha em 1995 (ENRICH-PRAST & ESTEVES, 2005); (ii) destacada colonização natural de espécies de igapó na área assoreada marginal do lago e, (iii) crescimento das espécies de igapó plantadas desde 1993 nas áreas marginais impactadas (SCARANO et al., 2018). Com isso, é comum observar presença de restos vegetais sobre o rejeito incrementando Matéria Orgânica ao sedimento superficial. Por isso, em algumas amostragens vem sendo verificado valores de Matéria Orgânica da área impactada superiores as obtidas em áreas naturais, este fato pode ser associado as observações feitas

pelos pesquisadores ao longo dos 28 anos de monitoramento do Lago Batata onde notou-se a alteração na estrutura das comunidades de macroinvertebrados bentônicos e mudanças na abundância das espécies da ictiofauna ao longo do tempo inicialmente pela presença de sedimento fino e mais recentemente associado a presença de Matéria Orgânica no sedimento (BOZELLI et al., 2000; SOARES et al., 2017).

As variáveis ambientais Turbidez, Sólidos Totais em Suspensão e Matéria Orgânica do Sedimento nos últimos 28 anos apresentaram tendência da estação impactada (E10) em direção aos valores observados para a estação natural (E07), indicando assim o comportamento do Lago Batata em relação ao impacto.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O diagnóstico atual evidencia após 28 anos de monitoramento a recuperação e melhoria da qualidade do lago na área impactada a partir do aumento de transparência da água (redução de Turbidez e Sólidos Totais em Suspensão) e melhoria do substrato (aumento de Matéria Orgânica). A variável Matéria Orgânica se destacou como um dos principais atores da recuperação do Lago Batata e parâmetro de referência.

O método (Prophet) indicou o contínuo decréscimo de Turbidez e Sólidos Totais em Suspensão, e o aumento de Matéria Orgânica do Sedimento na estação E10. Ressalta-se que todas as variáveis estão sujeitas a eventos aleatórios em virtude da imprevisibilidade do pulso de inundação, que rege o sistema hidrológico da região, bem com a intensidade e duração de suas fases. Entretanto como observado, ainda que esporadicamente ocorram eventos em que as variáveis Turbidez e Sólidos Totais em Suspensão apresentem aumentos repentinos a tendência de decréscimo se mantém.

## A GRADECIMENTOS

Agradecemos a Mineração Rio do Norte ao apoio logístico e operacional para as atividades de campo e aos integrantes que passaram pelo Laboratório de Limnologia da UFRJ ao longo dos 28 anos e participaram das atividades de campo e laboratório no Programa de Monitoramento e Estudos Ecológicos do Lago Batata. Também somos gratos ao Instituto Chico Mendes de Biodiversidade (ICMBio).

## REFERÊNCIAS

BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. **Numerical ecology with R**. Springer, 2018.

BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; ROLLAND, F. **Lago batata: impacto e recuperação de um ecossistema amazônico**. Rio de Janeiro: IB-UFRJ/Sociedade Brasileira de Limnologia, 2000.

BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; ROLAND, F. Mitigação do Impacto: passado, presente e futuro. *In*: BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. D. A.; ROLAND, F. (org.). **Lago Batata: impacto e recuperação de um ecossistema amazônico**. Rio de Janeiro: IB-UFRJ/Sociedade Brasileira de Limnologia, 2000. Cap. 18, p. 295-332.

CALLISTO, M.; ESTEVES, F. A. Composição granulométrica do sedimento de um lago Amazônico impactado por rejeito de bauxita e um lago natural (Pará, Brasil). **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 8, n. 1, p. 115-126, 1996.

CARNEIRO, L. S.; BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A. Long-term changes in the density of the copepod community in an Amazonian lake impacted by bauxite tailings. **Amazoniana**, v. 17, n. 3, p. 553-566, 2003.

ENRICH-PRAST, A.; ESTEVES, F. A. Flood pulse influence and anthropic impact on the chemical composition and energy content of *Oryza glumaepatula* in an Amazonian lake. **Brazilian Journal of Biology**, v. 65, n. 3, p. 451-458, 2005.

ESTEVES, F. de A. Princípios ecológicos para mitigação do impacto antrópico. *In*: R. L. Bozelli, F. D. A. Esteves, & F. Roland (org.). **Lago Batata: impacto e recuperação**

**de um ecossistema amazônico.** Rio de Janeiro: IB-UFRJ/Sociedade Brasileira de Limnologia, 2000. Cap. 1, p. 1-16

HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. **Forecasting: principles and practice.** otexts: Melbourne, Austrália, 2013.

LAPA, R. P. A bauxita e o rejeito da bauxita. *In:* R. L. Bozelli, F. A.; Esteves, F.; Rolland (org.). **Lago Batata: impacto e recuperação de um ecossistema amazônico.** Rio de Janeiro: IB-UFRJ/Sociedade Brasileira de Limnologia, 2000. Cap. 3, p. 27-5.

MÁRTIRES, R. A. C. (2009). Alumínio. *In:* RODRIGUES, A. F. S.(org.). **Economia Mineral do Brasil.** Brasília: Diretoria de Desenvolvimento e Economia Mineral – DIDEM, 2009.

PANOSSO, R. D.; MUEHE, D.; ESTEVES, F. D. Morphological characteristics of an Amazon floodplain lake (Lake Batata, Para State, Brazil). **Amazoniana**, v. 13, n. 3/4, p. 245-258, 1995.

PRANCE, G. T. A terminologia dos tipos de florestas amazônicas sujeitas a inundação. **Acta Amazonica**, v. 10, n. 3, p. 495-504, 1980.

SCARANO, Fabio Rubio *et al.* Twenty-five years of restoration of an Igapó Forest in Central Amazonia, Brazil. *In:* MYSTER, R. W. (org.). **Igapó (Black-water flooded forests) of the Amazon Basin.** Springer, Cham, 2018. p. 279-294.

SNEYERS, R. **Sur L'analyse Statistique Des Séries D'observations: Note Technique N. 143.** Secrétariat de l'Organisations Météorologique Mondiale, 1975.

SOARES, B. E. *et al.* Two-decade remaining effects of bauxite tailings on the fish taxonomic structure of a clear-water floodplain lake in central Amazon (Batatalake, Pará state, Brazil). **Oecologia Australis**, v. 21, n. 3, p. 311-322, 2017.

TAYLOR, S. J.; LETHAM, B. Package “prophet”: automatic forecasting procedure. R package version 0.5, 1–16. 2019. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/prophet/prophet.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2020.

ZHANG, W. *et al.* Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China. **Global and Planetary Change**, v. 69, n.1/2, p. 35-47, 2009.